

<b>Progetto:</b>	Misure e ed elaborazioni di idrologia dei suoli Ordinativo n.215 del 29 nov 2017
<b>Committente:</b>	<b>Università degli Studi di Firenze</b> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) Via Santa Marta, 3 50100 FIRENZE
<b>Professionista incaricato da SOILDATA srl:</b>	dott. <u>Lorenzo Gardin</u> <i>forestale-pedologo</i> 

Consegna del 8 gen 2018

### Introduzione

Al fine di effettuare un approfondimento conoscitivo del territorio dei bacini idrografici dei torrenti Carrione e Frigido orientato alla caratterizzazione del comportamento idrologico dei suoli e di superfici non occupate da suoli, ma oggetto di usi antropici che localmente hanno una significativa rilevanza, l'attività svolta si è concentrata in particolar modo sulle seguenti tre attività: realizzazione di uno strato dettagliato di unità di risposta idrologica; acquisizione in campo di misure e di parametri locali; elaborazione dei dati.

## Strato informativo delle unità di risposta idrologica

---

La suddivisione del territorio in unità di risposta idrologica è stata realizzata mediante interpretazione di ortofoto aeree di dettaglio disponibili presso il SITA di Regione Toscana, riprese nel 2016 con risoluzione a terra di 20 cm. La foto interpretazione è stata realizzata a video tenendo conto di altri strati informativi disponibili per il territorio sia quelli di scala regionale che di scala locale. In particolare sono stati acquisiti ed utilizzati:

Carta geomorfologica del Piano Strutturale del Comune di Carrara

Carta geomorfologica del Piano Strutturale del Comune di Massa

Carta Geomorfologica dell' Università di Pisa (Baroni, et al)

Continuum geologico fonte SITA Regione Toscana

Carta della permeabilità delle rocce IGG

Strato dei depositi superficiali fonte SITA Regione Toscana

Strato dei caratteri dei suoli fonte SITA Regione Toscana

Uso del suolo del 2013 fonte SITA Regione Toscana

La foto interpretazione è stata controllata con alcuni sopralluoghi a terra ed ha prodotto una legenda riportata per esteso in Appendice 1.

Le aree urbane, acquisite dallo strato uso del suolo, sono state aggregate in Aree urbane con copertura continua e in Aree urbane a copertura discontinua, al fine di differenziare e tenere in considerazione in

termini di superficie le aree da considerare interamente impermeabili da quelle da considerare parzialmente impermeabili quali quelle contenenti pertinenze, giardini etc.

Le aree estrattive (piazzi di cava, depositi di macchinari, etc), sono state acquisite prevalentemente dalle carte geomorfologiche dei piani operativi comunali e riviste in fotointerpretazione.

I depositi antropici derivanti dalle attività estrattive (ravaneti) sono stati classificati in base alla granulometria del deposito e a seconda del grado di copertura della vegetazione sul deposito stesso; la fonte del dato, per il bacino del Carrione è stata la Carta geomorfologica dell'Università di Pisa (Baroni, 2010); le classi granulometriche dei ravaneti individuate da Baroni sono state da noi state aggregate in 4: ravaneti attivi a granulometria più fine, a supporto di matrice, aventi mediamente clasti con dimensioni < 30 cm, sui quali frequentemente sono individuabili dei fenomeni di debris flow; ravaneti a granulometria grossolana, clasto sostenuti, aventi mediamente clasti con dimensioni >30 cm, privi di evidenze di fenomeni di debris flow; ad entrambe le tipologie di ravaneto è stato inoltre attribuito, mediante foto interpretazione, una qualifica indicante il grado di copertura della vegetazione erbacea, arbustiva o arborea. Nelle porzioni di territorio non coperte dalla carta dell'Università di Pisa si è operato mediante foto interpretazione utilizzando la predetta classificazione.

Le strade sono state acquisite dallo strato vettoriale dell'uso del suolo 2013 e sono state riviste e aggiornate mediante foto interpretazione. Per quanto riguarda le unità di uso del suolo appartenenti ai sistemi agricoli, forestali e agli ambienti naturali, sono state individuate e delineate, reinterprestando e approfondendo precedenti lavori (SITA - Dataset Pedologia), le unità di pedo-paesaggio, ovvero porzioni di territorio aventi simili caratteristiche per litologia del substrato pedogenetico, per fisiografia, per morfometria e per tipo di utilizzazione agricola, forestale o naturale. Tali unità di paesaggio esprimono al loro interno suoli con simili caratteri funzionali per fini idrologici. Infine per la definizione della classe "roccia affiorante" oltre alla foto interpretazione, si è utilizzato come strumento di supporto una classificazione dell'indice di vegetazione NDVI a partire da immagini con banda infrarosso.

Il codice univoco riportato nella legenda di Appendice 1 è riportato nello shape file "Fotointerpretazione", strato poligonale topologicamente corretto, fornito nel sistema di riferimento Monte Mario Italy 1.

## Il rilevamento dei parametri dei suoli

---

Sulla base della foto interpretazione e sulla distribuzione areale delle classi individuate è stato pianificato un rilevamento dei suoli per la caratterizzazione idrologica. Disponendo già di una parziale conoscenza dei suoli regionali e locali organizzata in profili pedologici, tipologie pedologiche e unità di pedopaesaggio (SITA-Dataset Pedologia), i nuovi punti di campionamento si sono concentrati sulle unità più peculiari dei bacini, sulle litologie e sulle forme maggiormente diffuse e sulle aree meno conosciute. L'obiettivo è stato quello di acquisire un cospicuo numero di campioni per poter calibrare con dati locali i modelli di stima dei principali parametri idrologici (conducibilità idraulica satura e ritenzione idrica) o di quei caratteri del suolo necessari ai suddetti modelli (densità apparente) desumibili da altri più largamente disponibili (granulometria, carbonio organico).

Sono stati campionati complessivamente 52 siti per ciascuno dei quali è stato prelevato un campione di suolo per la determinazione della granulometria e del carbonio organico nell'orizzonte più rappresentativo, generalmente intorno a 20-25 cm di profondità, escludendo gli orizzonti superficiali ologranici e quelli profondi, peraltro assai rari; in Appendice l'elenco dei siti con la localizzazione. La determinazione della granulometria è stata fatta su un campione vagliato a 2 mm, per setacciatura ad umido e sedimentazione. Le frazioni granulometriche sono espresse secondo la classificazione USDA, con cinque frazioni sabbiose, due frazioni limose e argilla (classe inferiore a 2 micron). Il carbonio organico è stato determinato per ossidazione totale con analizzatore elementare. Le determinazioni analitiche sono state svolte dal laboratorio Agribioeco di Pomezia (RM).

In un sotto campione di 31 siti è stato prelevato un campione per la determinazione della densità apparente, ovvero la massa volumica del suolo, mediante il metodo del carotatore, ovvero prelevando mediante fustella un volume noto di suolo e determinandone il peso secco.

Su 22 siti è stato prelevato un campione indisturbato di suolo per la determinazione della curva di ritenzione idrica, ottenuta misurando in laboratorio con diversi metodi e relative apparecchiature i contenuti di acqua volumetrici  $\theta_v$  a diverse tensioni (kpa): alle tensioni da 0 - 85 kpa con un apparato denominato "Piatto ceramico", mentre a più alte tensioni (500, 1000 e 1500 kpa) con apparato denominato "Piastra di Richards".

Il principio di funzionamento e di misura del **piatto ceramico** si basa sulla estrazione per suzione, attraverso una camera a vuoto che viene creata al di sotto della piastra, controllata da un estrattore a vuoto elettrico ed un pannello manometrico per controllare la soglia di tensione imposta.

La strumentazione usata per la determinazione dei punti della curva di ritenzione a 1000 e 1500 kpa di potenziale matriciale, è costituita da una **camera a pressione** (piastra di Richards), da piatti di ceramica porosa, da un sistema di regolazione della pressione, da una sorgente di aria compressa e da un sistema di controllo del flusso idrico che esce dalla camera a pressione.

Le determinazioni della curva di ritenzione idrica sui 22 campioni sono state realizzate dal Centro di ricerca per l'Agricoltura e l'Ambiente del Consiglio per la ricerca in Agricoltura e Economia (CREA) di Roma.

In un sottocampione di 13 siti è stato inoltre effettuata una misurazione della conducibilità idraulica satura, mediante Permeometro Guelph. Esso è uno strumento che opera a carico idraulico costante ed è utilizzato per l'esecuzione di prove in condizioni di falda freatica molto profonda o assente all'interno del profilo esplorato. Lo strumento determina la conducibilità idraulica in terreno saturo alle condizioni di campagna (field saturated hydraulic conductivity, Kfs) e trova maggior impiego nelle indagini pedologiche sia a scopo agronomico che ambientale (ad es. irrigazione, drenaggio, inquinamento, idrologia di superficie).

Dal punto di vista teorico, il sistema dei pori del suolo è considerato omogeneo ed isotropo, caratterizzato da pori continui. Adottando questo modello e considerando un geometria cilindrica è possibile definire una velocità apparente (secondo la legge di Darcy) del fluido che è direttamente proporzionale all'area della sezione del cilindro ed alla differenza di potenziale idraulico alle sue estremità ed inversamente proporzionale alla lunghezza del cilindro.

In Appendice 2 vengono riportati i risultati delle determinazioni analitiche, della densità apparente, delle curve di ritenzione e delle permeabilità.

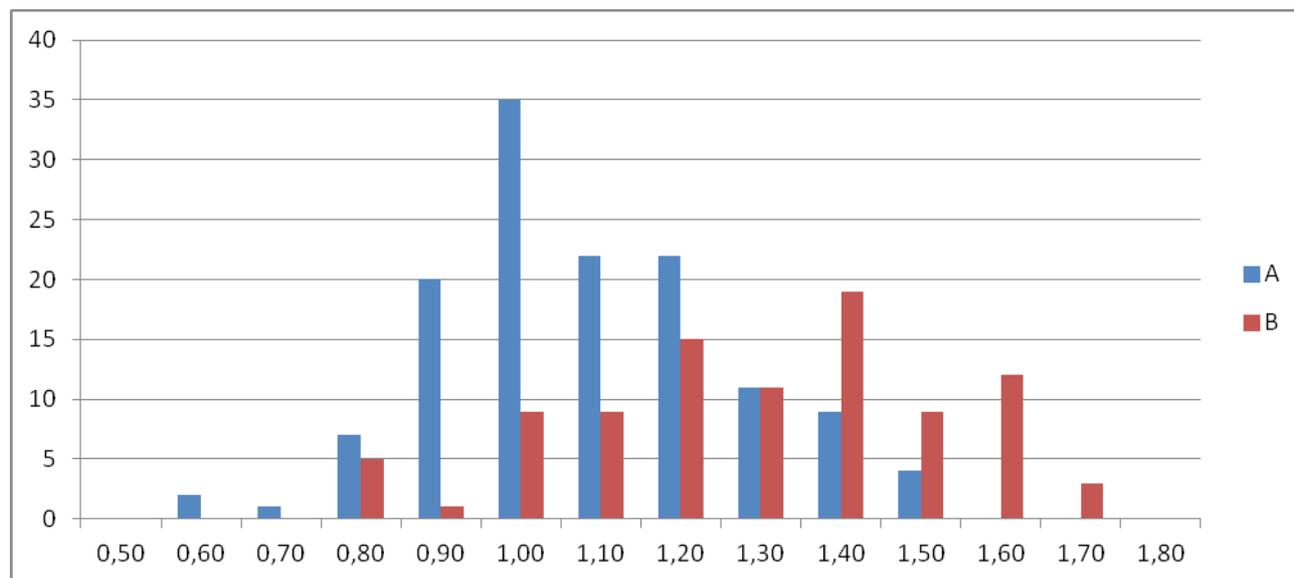
# Le elaborazioni per la determinazione dei parametri idrologici

Il campionamento dei suoli e le determinazioni analitiche sono state necessarie, come accennato, per poter acquisire un dataset minimale per la calibrazione dei modelli di stima (pedofunzioni) dei parametri idrologici quali Ksat e ritenzione idrica e per la stima di quelle caratteristiche fisiche richieste dai modelli stessi, quali ad esempio la densità apparente.

Per quanto riguarda la densità apparente, il dataset di calibrazione del modello di stima, composto dai dati appositamente rilevati in questo studio e da altri provenienti da profili pedologici presenti nei due bacini e in ambienti limitrofi su stesse litologie, dopo le opportune verifiche di qualità del dato, è rappresentato da 226 campioni; le statistiche descrittive delle variabili considerate sono riportate in Tabella 1 suddivise per tipo di orizzonte (A orizzonti superficiali; B orizzonti sotto superficiali) mentre in Figura 1 è mostrata la distribuzione di frequenza dei dati misurati di densità apparente.

	Orizzonti A						Orizzonti B					
	SK	SAB	LIM	ARG	COR G	DENSAP P	SK	SAB	LIM	ARG	CORG	DENSAPP
Media	12,56	44,24	39,64	16,12	2,97	1,04	42,54	21,13	12,81	8,60	37,56	1,25
Errore standard	0,90	1,65	1,25	0,89	0,17	0,02	1,83	1,13	0,82	0,58	1,20	0,02
Mediana	10,00	42,80	40,00	12,75	2,29	1,01	45,70	19,50	10,80	7,50	36,75	1,30
Moda	10,00	41,30	44,80	10,30	4,50	0,96	59,40	17,30	3,50	5,30	42,00	1,30
Deviazione standard	10,42	19,07	14,44	10,27	1,95	0,19	17,67	10,93	7,92	5,63	11,61	0,23
Minimo	0,00	5,90	6,40	1,29	0,48	0,58	2,50	0,80	0,90	0,80	17,20	0,74
Massimo	52,50	87,30	83,48	48,45	12,11	1,44	76,50	46,70	33,40	33,60	74,40	1,70
Conteggio	133	133	133	133	133	133	93	93	93	93	93	93

**Tabella 1. Statistiche descrittive del dataset (SK scheletro (%), SAB sabbia (%), LIM limo (%), ARG argilla (%), CORG carbonio organico (%), DENSAPP densità apparente (g/cm<sup>3</sup>))**



**Figura 1. Istogrammi di frequenza della densità apparente per tipo di orizzonte A e B.**

Oltre alle variabili pedologiche acquisite direttamente (tutte le classi granulometriche e il carbonio organico) sono stati considerati quali possibili regressori il diametro medio della particelle  $D_g$  (mm) e la sua deviazione standard  $S_g$  (-). Questi sono stati calcolati a partire dalle percentuali delle frazioni granulometriche applicando le seguenti relazioni (Shirazi et al, 1988):

$$D_g = \exp(a), \quad S_g = \exp(b)$$

dove

$$a = \sum_{i=1}^n f_i \ln(M_i) \quad \text{e} \quad b = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i (\ln(M_i))^2 - a^2}$$

con  $n$  il numero di frazioni granulometriche,  $f_i$  la quantità della  $i$  frazione, e  $M_i$  la sua media logaritmica.

Le pedofunzioni per la stima della densità apparente da utilizzare per i campioni di suolo privi della misura di tale parametro, sono state calibrate utilizzando regressioni lineari multiple; dove necessario l'analisi degli outlier ha portato all'eliminazione di alcune osservazioni al fine di ottenere relazioni più robuste. I risultati sono riassunti nelle seguenti tabelle, dove per ciascun tipo di orizzonte sono indicati i regressori selezionati e i termini delle equazioni (Tabella 2), i range delle variabili in input e output (Tabella 3), e le statistiche di calibrazione (Tabella 4) in termini di  $R^2$ , errore medio assoluto (MAE) e radice dello scarto quadratico medio (RMSE).

orizzonte	Intercetta	LN_ARG	LN_CORG	LN_Dg	Sg	LN_SABF	LN_SABMF
A	1,089581	0,009848	-0,187452	-0,020614			
B	1,343114	-0,066369	-0,167346		0,014088	-0,129507	0,101328

**Tabella 2. Parametri utilizzati per la stima della densità apparente.**

orizzonte	Range	SAB	LIM	ARG	C org	DENSAPP misurata	DENSAPP stimata
A	min	5,90	6,40	1,29	0,48	0,58	0,74
	max	87,30	83,48	41,70	9,65	1,38	1,38
B	min	12,30	17,20	5,30	0,19	0,74	0,99
	max	72,10	61,55	44,00	3,09	1,70	1,55

**Tabella 3. Range dei valori delle variabili per la calibrazione delle pedofunzioni per la stima della densità apparente.**

orizzonte	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	Num oss
A	0,474	0,098	0,129	66
B	0,348	0,144	0,174	47

**Tabella 4. Indici di errore per la calibrazione delle pedofunzioni per la stima della densità apparente.**

Per quanto riguarda la stima della conducibilità idraulica satura (Ksat) sono state effettuate 13 misurazioni in campo, i cui rapporti di prova sono riportati in appendice 2.

Le misure effettuate in campo hanno consentito di calibrare le pedofunzioni di Brackensiek (Brackensiek, 1984) e di Wosten (Wosten, 1998) entrambi algoritmi che utilizzano dati più largamente disponibili (granulometria, densità apparente, carbonio organico) per stimare la conducibilità idraulica del suolo.

L'errore delle pedofunzione per la stima della conducibilità idraulica, a causa della distribuzione log-normale dei valori misurati, è stato quantificato utilizzando la media geometrica, GMER, e la deviazione standard geometrica, GSDER, del rapporto tra conducibilità stimata e conducibilità misurata. La media geometrica del rapporto d'errore, GMER, restituisce il fattore medio di sovrastima o di sottostima rispetto ai valori misurati, ed è tanto migliore quanto più vicino ad uno.

Le statistiche relative al dataset di calibrazione delle pedofunzioni sono riportate nella tabella 5.

	<b>ARG (%)</b>	<b>LIM (%)</b>	<b>SAB (%)</b>	<b>DENSAPP (g/cm3)</b>	<b>C org. (%)</b>	<b>Ksat (cm/h)</b>
Numero osservazioni	13	13	13	13	13	13
Media	24,9	45,8	29,3	1,04	2,36	4,42
Errore standard	4,18	4,61	4,85	0,05	0,30	1,37
Deviazione standard	15,07	16,63	17,48	0,20	1,09	4,93
Minimo	3,83	17,63	12,70	0,73	0,74	0,23
Mediana	25,50	41,72	23,50	0,96	2,20	2,51
Massimo	48,45	83,48	76,00	1,40	4,83	18,51

**Tabella 5. Dataset di calibrazione delle pedofunzioni per la stima della Ksat.**

Le equazioni fornite dagli autori in forma originaria sono le seguenti:

Brakensiek:

$$K_{sat} \text{ (cm/h)} = \text{EXP} (-8,96847 - \text{arg} \cdot 0,028212 + ((1 - \text{DA}/2,65)) \cdot 19,52348 + 0,0001811 \cdot \text{sab}^2 - 0,0094125 \cdot \text{arg}^2 - 8,395215 \cdot ((1 - \text{DA}/2,65))^2 + \text{sab} \cdot ((1 - \text{DA}/2,65)) \cdot 0,077718 + (\text{sab}^2) \cdot \text{arg} \cdot 0,0000173 + (\text{arg}^2) \cdot ((1 - \text{DA}/2,65)) \cdot 0,02733 + (\text{sab}^2) \cdot ((1 - \text{DA}/2,65)) \cdot 0,001434 - \text{sab} \cdot (\text{arg}^2) \cdot 0,0000035 - 0,00298 \cdot (\text{sab}^2) \cdot ((1 - \text{DA}/2,65))^2 - 0,019492 \cdot (\text{arg}^2) \cdot ((1 - \text{DA}/2,65))^2)$$

Wosten:

$$K_{sat} \text{ (cm/h)} = 7.755 + 0.0352 \cdot \text{sab} + 0.93 \cdot \text{topsoil} - 0.967 \cdot \text{DA}^2 - 0.000484 \cdot \text{arg}^2 - 0.000322 \cdot \text{sab}^2 + 0.001 \cdot \text{sab} \cdot \text{topsoil} - 0.0748 \cdot \text{OM} \cdot \text{topsoil} - 0.643 \cdot \ln(\text{sab}) - 0.01398 \cdot \text{DA} \cdot \text{OM} - 0.1673 \cdot \text{DA} \cdot \text{OM} + 0.02986 \cdot \text{topsoil} \cdot \text{arg} - 0.03305 \cdot \text{topsoil} \cdot \text{sab}$$

dove: le frazioni granulometriche sono in %; OM = % sostanza organica; DA = densità apparente (g/cm3); topsoil = 1; subsoil = 0;

I parametri di calibrazione sono riportati nella Tabella 6, mentre nella Tabella 7 per entrambe le PTF calibrate sono riportati i valori della media geometrica del rapporto di errore (GMER) e la sua deviazione standard geometrica (GSDER), oltre ai range dei valori di Ksat predetti considerando l'intero dataset (n=13).

	Brackensiek	Wosten
par1	-8,41818	15,993
par2	0,15338	0,265
par3	19,52081	0,393
par4	0,00000	1,887
par5	-0,00403	0,00000
par6	-8,39680	0,001919
par7	0,02584	0,000
par8	0,00005	0,062
par9	0,00001	4,491
par10	1,15E-11	0,026
par11	-1,00E-09	0,000
par12	-0,000594096	0,03240
par13	-7,07795E-07	0,000

**Tabella 6. Parametri di calibrazione per le pedofunzioni di stima della Ksat.**

	GMER	GSDER	min	max
Brackensiek	1,00	1,84	0,616	7,075
Wosten	1,00	3,85	0,702	31,807

**Tabella 7. GMER e GSDER e range dei valori di Ksat ottenuti dalle pedofunzioni calibrate.**

Le pedofunzioni sono state utilizzate in base alla classe granulometrica del campione; per le classi franche si è utilizzato la pedofunzione Wosten, mentre per le classi sabbiose e argillose la pedofunzione di Brackensiek; la calibrazione delle pedofunzioni ha consentito la stima della Ksat per i campioni di suolo privi di misurazioni a condizione che i dati in input (granulometria, densità apparente e carbonio organico) rientrasse nei range del dataset di calibrazione. Inoltre, data la peculiarità dei suoli campionati (contenuto in carbonio organica, bassa densità apparente, elevato contenuto in scheletro) le pedofunzioni calibrate sono state applicate ai soli orizzonti dei profili appartenenti alle litologie principali dei due bacini (marmi, grezzoni, filladi, calcari) per le quali sono disponibili le misure di Ksat; per i profili su altre litologie (prevalentemente flysch) si sono utilizzate le pedofunzioni con i parametri originali forniti dagli autori.

Il valore più basso di conducibilità idraulica di un orizzonte all'interno di ciascun profilo è stato assunto quale valore di conducibilità dell'intero profilo. La spazializzazione dei valori di Ksat dei profili è stata effettuata mediante il criterio della relazione suolo-paesaggio adottato per ogni valutazione relativa alla cartografia pedologica classica.

I risultati delle elaborazioni ottenute per singola unità cartografica sono associate allo shape file e riportano i valori minimo, massimo e medio assunti dalla variabile.

Per quanto riguarda la ritenzione idrica dei suoli, il modello Modibic richiede la stima del contenuto di acqua gravitazionale e di acqua capillare per effettuare il bilancio idrico. Il meccanismo che regola l'accesso dell'acqua a tutti i vuoti del suolo è fortemente influenzato dalla variabilità dimensionale dei vuoti presenti (Busoni *et al.*, 1986). I vuoti di dimensioni maggiori ( $>60\mu$ ) sono caratterizzati da un moto dell'acqua causato essenzialmente dalla forza di gravità. Nei pori più fini ( $<60\mu$ ) il movimento dell'acqua, avviene ad opera del richiamo capillare, si riempiono perciò più lentamente ma si ha una maggiore permanenza dell'acqua al loro interno. Per conoscere il quantitativo di acqua gravitazionale e di acqua capillare si sono modellate per ogni orizzonte di suolo le specifiche curve di ritenzione idrica, espressione della distribuzione del diametro dei pori nel suolo.

La modellazione è avvenuta facendo ricorso a stime indirette a partire dai dati delle caratteristiche degli orizzonti quali la tessitura, la densità apparente, il contenuto in sostanza organica, calibrate con le misure raccolte, utilizzando il modello teorico di Van Genuchten (1980) per la formulazione analitica di una curva continua di ritenzione idrica.

I dati di ritenzione idrica misurati sono stati oggetti di fitting al fine di ottenere i parametri della funzione di Van Genuchten ( $\theta_{sat}$ ,  $\theta_{res}$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) mediante l'uso del software SWRC Fit (<http://seki.webmasters.gr.jp/swrc/>) (Seki, 2007). Una volta ottenuti i coefficienti della funzione di Van Genuchten è stato possibile calcolare i contenuti di acqua volumetrici corrispondenti a qualunque tensione. Con i dati di ritenzione idrica fittati si è costruito delle pedofunzioni, mediante regressione lineare multipla per ottenere degli algoritmi di stima del contenuto idrico dei suoli ai più significativi valori di potenziale. Si riporta qui di seguito il dataset utilizzato.

	<b>SAB</b>	<b>LIM</b>	<b>ARG</b>	<b>CORG</b>	<b>DA</b>	<b>sat</b>	<b>5kPa</b>	<b>33kPa</b>	<b>1500kPa</b>
Conteggio	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Media	37,00	44,04	18,95	3,16	1,08	0,32	0,25	0,21	0,16
Errore standard	4,29	3,56	3,04	0,52	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02
Deviazione standard	20,10	16,69	14,25	2,46	0,17	0,08	0,07	0,07	0,07
Minimo	12,70	15,23	3,83	0,73	0,73	0,20	0,13	0,09	0,05
Mediana	30,75	40,68	17,85	2,23	1,07	0,31	0,26	0,23	0,17
Massimo	78,40	83,48	48,45	9,65	1,49	0,48	0,41	0,36	0,34

**Tabella 8. Statistiche descrittive del dataset (SAB sabbia (%), LIM limo (%), ARG argilla (%), CORG carbonio organico (%), DENSAPP densità apparente (g/cm<sup>3</sup>), contenuto idrico a vari potenziali).**

---

I risultati sono riassunti nelle seguenti tabelle, dove per ciascun punto di potenziale sono indicati i regressori selezionati e i termini delle equazioni (Tabella 9), i range delle variabili in input e output (Tabella 10), e le statistiche di calibrazione (Tabella 11) in termini di  $R^2$ , errore medio assoluto (MAE) e radice dello scarto quadratico medio (RMSE).

	<b>Intercetta</b>	<b>SAB</b>	<b>ARG</b>	<b>CORG</b>	<b>DA</b>
<i>Sat</i>	0,347632	-0,00269	-0,00147	0,010315	0,059161
<i>5kPa</i>	0,163181	-0,0017	0,000484	0,011157	0,100603
<i>33kPa</i>	0,08083	-0,00151	0,001462	0,013661	0,107404
<i>1500kPa</i>	0,021771	-0,00164	0,002091	0,01773	0,10114

**Tabella 9. Regressori e coefficienti utilizzati per la stima della ritenzione idrica a vari punti di potenziale.**

	<b>SAB</b>	<b>LIM</b>	<b>ARG</b>	<b>CORG</b>	<b>DA</b>	<b>Sat _s</b>	<b>Sat _m</b>	<b>5kPa _s</b>	<b>5kPa _m</b>	<b>33 kPa _s</b>	<b>33 kPa _m</b>	<b>1500kPa _s</b>	<b>1500kPa _m</b>
<i>min</i>	12,7	15,2	3,8	0,7	0,73	0,20	0,20	0,15	0,13	0,10	0,09	0,04	0,05
<i>max</i>	78,4	83,5	48,5	9,6	1,49	0,39	0,43	0,34	0,38	0,32	0,36	0,29	0,34

**Tabella 10. Range dei valori delle variabili utilizzate per la calibrazione delle pedofunzioni per la stima della ritenzione idrica. Per i contenuti idrici si riporta il valore da fitting di misure (*\_m*) e il valore stimato da pedofunzione (*\_s*).**

	<b><math>R^2</math></b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>
<i>Sat</i>	0,525	0,036	0,046
<i>5kPa</i>	0,510	0,034	0,043
<i>33kPa</i>	0,633	0,031	0,039
<i>1500kPa</i>	0,673	0,034	0,043

**Tabella 11. Indici di errore per la calibrazione delle pedofunzioni per la stima della ritenzione idrica.**

Tali algoritmi sono stati utilizzati soltanto per i suoli delle litologie su cui sono state effettuate il maggior numero di misurazioni (marmi, grezzoni, filladi e calcari) e i cui dati rientrano nel range delle pedofunzioni. Parallelamente, per i suoli su altre litologie e per quelli con caratteristiche fuori dal range di calibrazione, è stato utilizzato il software Rosetta (Shaap, 199) con il quale sono stati calcolati i parametri idrologici secondo il modello di Van Genuchten, con i quali sono stati elaborati i contenuti idrici ai diversi potenziali. In entrambi i casi (pedofunzioni localmente calibrate e pedofunzioni del software Rosetta) sono state effettuate le stime della ritenzione idrica a diversi potenziali per tutti gli orizzonti pedologici; essi sono stati successivamente aggregati a livello di profilo pedologico in considerazione dello spessore degli orizzonti e

della profondità del suolo. Anche nel caso dei contenuti in acqua gravimetrica e in acqua capillare la spazializzazione è stata effettuata mediante il criterio della relazione suolo-paesaggio.

I risultati delle elaborazioni ottenute per singola unità cartografica sono associate allo shape file e riportano il valore minimo, massimo e medio assunti dalle variabili.

### **La stima dei parametri idrologici nelle aree di non suolo**

L'attribuzione di parametri idrologici necessari al modello Mobidic per le aree di non suolo si è basata su dati bibliografici e su criteri di stima di esperto.

Le aree urbane a copertura continua, le aree estrattive (cave), le strade e i corsi d'acqua sono classi considerate interamente impermeabili e con nessuna ritenzione idrica, mentre le aree urbane a copertura discontinua sono state considerate impermeabili per una percentuale pari al 60% e in condizioni di media permeabilità per il rimanente 40% della superficie.

Per quanto riguarda i ravaneti la complessità granulometrico-tessiturale che controlla il comportamento idrogeologico e meccanico è molto elevata e pertanto molto onerosa da caratterizzare e da descrivere in dettaglio; per la valutazione del comportamento idrologico sono stati utilizzate come riferimento le descrizioni qualitative (Baroni, et al., 2000) e alcune curve granulometriche (Cortopassi et al. 2008).

Ai ravaneti grossolani è stata attribuita una permeabilità molto alta, assimilandoli alla classe relativa alle ghiaie pulite, considerato che i ravaneti antichi hanno un minore contenuto in matrice (al massimo fino al 30%) costituita prevalentemente da sabbia (68%) (Baroni, et al., 2000).

Ai ravaneti fini, recenti, è stata attribuita una permeabilità alta, assimilandoli a ghiaie in matrice sabbioso-limoso; la matrice dei depositi (<1cm) è relativamente abbondante nei ravaneti attivi (dal 40% al 50 %) e composta da sabbia e silt in proporzioni circa uguali (Baroni, et al., 2000); tale stima ha preso in considerazione anche una misura di Ksat effettuata su deposito ghiaioso in matrice sabbiosa.

Per quanto riguarda le aree estrattive esse sono state considerate prudenzialmente aree impermeabili, sebbene in esse possano esistere aree di accumulo di materiali e di depositi.

Per quanto riguarda la roccia affiorante, i parametri idrologici sono stati derivati dalla litologia e dalle valutazioni effettuate in studi pregressi (Piccini, Pranzini G, 1989; IGG-CNR, 2009 - Carta della permeabilità).

I valori attribuiti ad ogni classe di fotointerpretazione sono associate allo shape file e riportano i valori minimo, massimo e medio assunti dalle variabili.

## Bibliografia

---

C. Baroni\*, G. Bruschi\*\*, A. Criscuolo\*\*\*, A. Ribolini\* (2000) – Il rischio geomorfologico indotto dall'attività estrattiva dei Bacini marmiferi apuani (Alpi Apuane, Toscana)

C. Baroni\*, P. Mannucci\*, G. Bruschi\*\*, A. Ribolini\* (2010) - Geomorphological map of the Carrara marble basin (Apuan Alps, Toscana) – Scala 1:10.000

Baroni C., Bruschi G., Ribolini A., 2000. Human-induced hazardous debris flows in Carrara Marble basins (Tuscany, Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, p. 93-103.

Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. and Stephenson, G.R., 1984. Determining the saturated hydraulic conductivity of a soil containing rock fragments. *Soil Science Society of America Journal* 50, 834-835.

Cortopassi P.F., Daddi M., D'Amato Avanzi G., Giacomo A., Giannecchini R., Lattanzi G., Merlini A., Milano P.F., 2008. Quarry waste and slope instability: preliminary assessment of some controlling factors in the Carrara marble basin (Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and environment*, 99-118.

Piccini L., Pranzini G. - Idrogeologia e carsismo del bacino del fiume Frigido - *Atti soc. tosc. sci. nat., mem., serie a*, 96 (1989) pagg. 107-158.

IGG-CNR 2009 – Convenzione per la realizzazione delle banche dati tematiche litotecnica descrittiva, permeabilità, geomorfologia, derivate dalla banche dati geologici.

Schaap. M., Leij F.J., van Genuchten M.T., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.

Seki, K. 2007. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4: 407-437.

Shirazi, M. A., Boersma, L. e Hart, W., 1988. A unifying quantitative analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 181-190.

van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Wosten J. H. M., Lilly A., Nemes A., and Le Bas C., 1998. Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Models in Environmental Studies and in Land Use Planning. Final Report on the European Union Funded Project, SC-DLO, Wageningen.

**SoilData s.r.l.**

***suolo territorio ambiente***

---

---

Piazza Donatello, 24  
50132 – Firenze  
Tel. 347 5462964

C.F. e P.IVA: 05824480486  
REA: FI-578251